DOI: 10.22067/geography.v16i2.68945

ارزیابی فضایی پتانسیل نصب صفحات خورشیدی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (نمونهٔ موردی: بخشی از ناحیهٔ ۲ منطقهٔ ۸ کلان‌شهر مشهد)

زهرا شیرزاد (کارشناس ارشد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران)
zahra.shirzad@mail.um.ac.ir
مسعود مینائی (استادیار علم اطلاعات جغرافیایی (GIScience)، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، نویسندهٔ مسئول)
m.minaei@um.ac.ir
فؤاد مینائی (دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران، تهران، ایران)
minaei.foad@ut.ac.ir

صص ۱۲۴ ـ ۱۰۳

چکیده

اهداف: بهره‌گیری از انرژی‌های خورشیدی گام بسیار مؤثری در زمینهٔ رسیدن به شهرهای پایدار و قابل سکونت‌تر است. از این رو، در پژوهش حاضر، پتانسیل‌سنجی سطوح پشت‌بام ساختمان‌ها جهت نصب صفحات خورشیدی در بخشی از ناحیهٔ ۲ منطقهٔ ۸ شهر مشهد بررسی شد.

روش: روش تحقیق از نظر ماهیت، توصیفی- تحلیلی و از لحاظ هدف، کاربردی است. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها شامل (کاربری قطعات، ارتفاع ساختمان‌ها، میزان جمعیت، درآمد بیست‌ساله، شیب و جهت شیب، توان پتانسیل، سایه‌اندازها، مساحت پشت‌بام و میزان کیلووات تولیدی) از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل مدل تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و مدل میانگین‌گیری وزنی (OWA) استفاده شده است.

نتایج/ یافته‌ها: نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که از مجموع مساحت ۹۲۳ قطعهٔ ارزیابی‌شده در محدودهٔ مورد مطالعه، نزدیک به ۱۹ هزارمتر مربع از فضای پشت‌بام‌ها در بهترین شرایط جهت نصب صفحات خورشیدی قرار گرفته‌اند. این

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۲   تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۰۷/۲٤

پتانسیل ارزشمند با توجه به سابقهٔ تجاری-مسکونی منطقهٔ مورد نظر و میزان مصرف بالای انرژی برق می‌تواند در تأمین و پایداری تولید انرژی مورد نیاز محدوده و حتی بیشتر از آن بسیار مؤثر باشد.

کلیدواژه‌ها: سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، انرژی خورشیدی، مدل میانگین-گیری وزنی، AHP، منطقهٔ ۸ ، مشهد.

۱. مقدمه

امروزه انرژی یکی از نیازهای اولیهٔ زندگی بشر محسوب می‌شود و با توجه به ذخایر محدود انرژی فسیلی و افزایش سطح مصرف انرژی در جهان فعلی، دیگر نمی‌توان به منابع موجود انرژی متکی بود (حسن‌زاده، فرزاد ۱۳۹۰، ص. ۲۰؛ هاتفی‌اردکانی و رضائی‌مقدم، ۱۳۹٤، ص. ۱۰۵؛ کمالی و مرادی، ۱۳۸۵، ص. ٤۲). پایان‌پذیر بودن، آلودگی‌های زیست محیطی و نوسانات قیمت انرژی‌های فسیلی (هاتفی‌اردکانی و رضائی‌مقدم، ۱۳۹٤، ص. ۱۰۵؛ حیدری، ۱۳۸۸، ص. ۳۵)، نیروهای محرکهٔ اصلی در پشت تلاش‌های مؤثرتر جهت استفاده از منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشند. علاوه بر این، انرژی خورشیدی یکی از مهم-ترین و پاک‌ترین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر بوده و رایگان است (موقری، طاوسی، ۱۳۹۲، ص. ۱۰۰؛ کمانگر، نوحه گرا، صحراگرد، آریانژاد، بداغی، ۱۳۹٤، ص. ۱۳۸). قابلیت دریافت انرژی خورشیدی در کشور ایران به دلیل عرض جغرافیایی آن بسیار بالاست (موقری و طاوسی، ۱۳۹۲:، ص.۱۰۰). اما به دلیل گستردگی و عوارض جغرافیایی متنوع در گسترهٔ آن متفاوت می باشد. با این حال، برخورداری از منابع عظیم سوخت‌های فسیلی، باعث شده است که بکارگیری انرژی خورشیدی در آن ناچیز باشد (کمانگر، نوحه گرا، صحراگرد، آریانژاد، بداغی، ۱۳۹٤، ص. ۱۳۸). بر اساس اطلس جامع GIS انرژی خورشیدی ایران، میزان متوسط سالیانهٔ انرژی تابش کل خورشید بر سطح افقی و مقدار متوسط سالانهٔ ساعات آفتابی در ایران به ترتیب برابر ۵۲۳۷ وات ساعت بر مترمربع در روز و ۳۱۵۳/۲ ساعت برآورد شده است (حق‌پرست کاشانی، صالح ایزدخواست و لاری، ۱۳۸۸، صص. ۱٦۹-۱۵۸). انرژی خورشیدی می‌تواند بدون خطر و انتشار آلاینده‌های هوا، به شکل‌های دیگر انرژی تبدیل شود.

از این انرژی می‌توان به شکل مستقیم به‌عنوان منبع تولید گرما در جمع‌کننده‌ها و یا به صورت غیرمستقیم در تولید برق در سلول‌های خورشیدی (فتوولتائیک) استفاده کرد (عساکره، غدیریان فر، شیخ داودی، ١٣٩٤، ص.١١٥). با گسترش این سیستم‌ها در سطح ایران، می‌توان بخش کلانی از نیازهای فزاینده این جمعیت روزافزون را فراهم آورد (فرجی سبکبار، پاک طینت مهدی آبادی، رحیمی کیان، عشورنژاد، ١٣٩٢، ص. ٤٦). نظر به مشکلات موجود در زمینهٔ احداث نیروگاهای فتوولتائیک، یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن‌ها استفاده در ساختمان‌ها جهت تأمین بخشی از برق مصرفی می‌باشد (عساکره، غدیریان فر، شیخ داودی، ١٣٩٤، ص. ١١٦). چراکه در چنین شرایطی انرژی تولیدشده با توجه به نوع مصرف و نیاز خانگی یا تجاری همخوانی داشته و علاوه بر این در کمترین فاصلهٔ ممکن از مصرف‌کننده قرار خواهد داشت. با توجه به اینکه مقدار تولید این سیستم‌ها به مقدار زیادی وابسته به جهت، زاویه و مکان نصب پانل‌ها می‌باشد (عشورنژاد، پاک طینت، درویشی بلورانی، ١٣٩٣، ص. ٣٤). بنابراین، گام اول در جهت توسعهٔ استفاده از انرژی خورشیدی، شناسایی فاکتورهای مؤثر و بعد از آن مکان‌یابی نواحی است که در آن انرژی خورشیدی در حد مطلوب می‌باشد (فلاح، فرج زاده، اسلامی، سلطانی فر، ١٣٩٢، ص.٢). در این راستا، شناسایی مناطق مستعد برای نصبِ پانل خورشیدی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS می‌تواند نتایج بهینه‌ای را ارائه کند. نظر به مطالب بیان شده، از آنجا که کلان‌شهر مشهد دارای آلودگی هوا، وسایل نقلیهٔ بسیار، جمعیت میلیونی مجاوران و زوار و نیز بافت شهری و ساختمان‌های متفاوت بوده و مسئولین شهری نیز به دنبال توسعهٔ هرچه پایدارتر این کلان‌شهر می باشند، لزوم انجام مطالعه‌ای در زمینهٔ شناسایی مکان‌های مناسب جهت نصب پانل‌های خورشیدی در سطح شهر، ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، پژوهش حاضر در صدد است به پتانسیل‌سنجی سطوح پشتِبام ساختمان‌ها جهت نصب صفحات خورشیدی در بخشی از ناحیهٔ ٢ منطقهٔ ٨ شهر مشهد بپردازد. در این راستا ابتدا عوامل تأثیرگذار بر تولید انرژی خورشید شناسایی شده، بنابر استانداردهای موجود شرایط بهره‌برداری و نصب تعیین شده و در نهایت مکان‌های دارای بیشترین پتانسیل شناسایی خواهند شد.

۲. پیشینهٔ پژوهش

یکی از مهم‌ترین مسائل در استفاده از انرژی خورشیدی، تعیین محل استفاده از آن می‌باشد که تأثیر زیادی در کارایی تجهیزات و وسایل تولید برق خورشیدی دارد (موقری و طاوسی، ۱۳۹۲، ص. ۱۰۰). تاکنون در زمینهٔ پتانسیل‌سنجی ساختمان‌ها، جهت نصب پانل خورشیدی در جهان و ایران تحقیقات اندکی صورت گرفته که به قرار زیر می‌باشند. در پژوهشی برایان، رالپالی، راسموسن و فوله [1] (۲۰۱۰) با عکس‌های هوایی و Google Earth ساختمان های عمومی شهر فونیکس را شناسایی کردند، سپس با استفاده از معیارهای جهت، شیب سطح پشت‌بام، سایهٔ درختان، تجهیزات پشت‌بام، سایهٔ دیواره پشت‌بام و سایهٔ ساختمان‌های همجوار، ساختمان‌های با پتانسیل زیاد برای نصب صفحات فتوولتائیک شناسایی شد (برایان، ۲۰۱۰، صص. ۷-۱). برانت[2] (۲۰۱۳) در پژوهشی دیگر با عنوان «مدلسازی ظرفیت خورشیدی در پشت‌بام ساختمان‌ها با استفاده از GIS در شهر استیل واتر» به بررسی و تجزیه و تحلیل ظرفیت کل انرژی خورشیدی در پشت‌بام ساختمان‌های مسکونی و تجاری پرداخت. نتایج حاکی از آن است که تقریبا نیمی از املاک مسکونی، پتانسیل جذب حداقل نیمی از انرژی خورشیدی را دارند. همچنین، چودهاری، آگاروال، تومار، کوما[3] (۲۰۱٦) با هدف ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی در ساختمان‌ها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی به پژوهشی با عنوان «ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی در پشت‌بام‌ها با استفاده از GIS به منظور نصب پانل خورشیدی» در شهر نُویدا هندوستان پرداختند. در مطالعات اندک انجام‌شده در ایران: عشورنژاد، پاک طینت، درویشی بلوران (۱۳۹۳) به مدل‌سازی مکان بهینهٔ استقرار پانل‌های خورشیدی در پشت‌بام ساختمان‌ها با استفاده از GIS در بخش کوچکی از شهر تهران پرداختند. ایشان به دنبال ارائهٔ مدلی در خصوص شناسایی مکان‌های بهینه جهت استقرار پانل‌های خورشیدی می‌باشند. نتایج نشان داد که انتخاب مکان مناسب برای نصب پانل‌های خورشیدی در محدودهٔ وسیع شهرها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی امکان‌پذیر است.

1. Brayan, et al
2. Brandt
3. Choudhary, et al

عساکره، غدیریان فر، شیخ داودی (۱۳۹٤) نیز در پژوهش خود به امکان‌سنجی تولید برق با پنل‌های خورشیدی بر روی پشت‌بام در مناطق روستایی استان خوزستان پرداخته‌اند. ایشان به سنجش و بررسی پتانسیل‌های فیزیکی، جغرافیایی و فنی این امر توجه داشته‌اند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳. ۱. روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر ماهیت، توصیفی- تحلیلی و از لحاظ هدف، کاربردی می‌باشد. روش گردآوری اطلاعات به صورت اسنادی/ کتابخانه‌ای و میدانی می‌باشد. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل مدل تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)[1] و مدل میانگین‌گیری وزنی ترتیبی (OWA)[2]در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 استفاده شد که در ادامه به شرح آن پرداخته شده است.

۳. ۲. تکنیک‌های مورد استفاده در پژوهش

مدل تحلیل فرآیند سلسله‌مراتبی (AHP)

جهت انجام روش مقایسه زوجی ابتدا هر یک از معیارهای مورد بررسی را به صورت زوجی مقایسه کرده و میزان اهمیت نسبی هر یک را نسبت به دیگری، بین ۱ تا ۹ اختصاص داده و آن را در یک ماتریس وارد می‌کنیم (رهنما، حیاتی، شیرزاد، کاظمی، قنبری، ۱۳۹٦، ص. ۲۷). وزن هر شاخص نشان‌دهندۀ اهمیت و ارزش آن نسبت به شاخص‌های دیگر در عملیات تعیین مکان است. بنابراین، انتخاب آگاهانه و صحیح وزن‌ها در جهت تعیین هدف مورد نظر بسیار کمک می‌کند. برای انجام وزن‌دهی باید یک پرسش‌نامه زوجی را طراحی و بعد از پر شدن آن توسط کارشناسان، براساس یکی از روش‌های نرمالیزه وزن نهایی هر عامل محاسبه شود (خواجه شکوهی، ۱۳۹۳، صص. ۱۰۱-۱۰۰). در پژوهش حاضر بنابر نظرات خواجه شکوهی (۱۳۹۳) که تعداد پرسش‌نامۀ لازم برای این روش را حداقل ۱۰ عدد می‌دانند، تعداد

1. Analytical hierarchy process
2. Ordered Weighted Average

۱۰عدد پرسش‌نامه در بین متخصصان و فعالان در این زمینه توزیع شده و نتایج با استفاده از نرم افزار ExpertChoice تحلیل شد و وزن هرکدام از فاکتورها مشخص شد.

مدل میانگین‌گیری وزن‌دار ترتیبی (OWA)

روش میانگین وزنی مرتب‌شده (OWA) به‌عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری که قابلیت در نظر گرفتن اولویت‌ها و ارزیابی ذهنی تصمیم‌گیرنده را داراست، معرفی می‌شود (حاجیلو و نیارکی، ۱۳۹۵، صص. ۷۸-۷۷). این روش ترکیب نسبتا جدید تحلیل چند معیاره[1] (MCA) بوده و بوسیله یاگر معرفی شده است (جیانگ و ایستمن، ۲۰۰۰، صص. ۱۸٤-۱۷۳). روش میانگین‌گیری وزن‌دار ترتیبی OWA قادر به محاسبهٔ میزان ریسک‌پذیری و ریسک‌گریزی افراد و اعمال آن در انتخاب گزینهٔ نهایی است (رهنما، آقاجانی، فتاحی، ۱۳۹۱، ص. ۹۱). توانایی روش OWA در این است که منجر به درجه‌بندی پیوسته سناریوهایی بین عملگر اشتراک (خطر ناسازگاری- ریسک‌ناپذیری) و عملگر اجتماع (ریسک‌پذیری) می‌شود. روش OWA مانند روش ترکیب خطی وزنی (WLC)[2] بوده؛ اما دو مجموعه از وزن‌ها را در برمی‌گیرد. اولین مجموعه از وزن‌ها سهم نسبی معیار خاص را کنترل می‌کند؛ در حالی که مجموعهٔ دوم وزن‌ها رتبهٔ تجمع (اجتماع) معیارهای وزن‌دار را کنترل می‌کند (جیانگ و ایستمن[3]، ۲۰۰۰، صص. ۱۸٤-۱۷۳). جاذبهٔ روش OWA این است که محقق می‌تواند به‌واسطهٔ دوباره مرتب‌سازی و تغییر پارامترهای معیار، دامنهٔ وسیعی از نقشه‌ها و راه‌حل‌های مختلف و سناریوهای پیش‌بینی را تولید کند. برخلاف همپوشانی بولین که عملگر اشتراک (AND) ریسک پایین را نشان می‌دهد، عملگر اجتماع (OR) ریسک بالا در تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. این روش می‌تواند یک طیف کامل سناریوهای ریسک بین دو حد (مرز) عملگرهای اشتراک (AND) و اجتماع (OR) را به دست دهد. اریب نسبی وزن‌های ترتیبی سطح ریسک مرتبط با بینAND و OR را می‌توان در پیوستگی بینAND و OR از طریق معادلات در OWA به دست آورد. این معادلات شامل؛ ANDness درجه‌ای است که عملگر OWA شبیه به AND منطقی و ORness درجه‌ای که عملگر OWA شبیه OR منطقی است

1. Multi-Criteria Analysis
2. Weighted Linear Combination
3. Jiang & Eastman

را اندازه‌گیری می‌کند. درجهٔ پراکندگی وزن‌ها را سطح TRAD-OFF کنترل می‌کند که اندازهٔ جبران‌پذیری را نشان می‌دهد (رهنما و همکاران، ۱۳۹۱، ص. ۹۲). پیاده سازی مدل OWA با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری MCDA4ArcMap که یک add–in برای نرم‌افزار ArcGIS می‌باشد، انجام گرفت. این نرم‌افزار قابلیت‌های تحلیل تصمیم چند معیاره و تهیهٔ نقشه‌های موضوعی به صورت تعاملی را در ArcGIS ممکن می‌سازد.[۱]

۳. ۳. معیارهای مورد استفاه در پژوهش

جهت استخراج معیارهای مرتبط با موضوع، تحقیقات انجام‌گرفته در این زمینه ارزیابی شد. با توجه به عوامل مختلف کالبدی، اجتماعی و جمعیت‌شناختی، زیست‌محیطی و فنی، معیارهای مورد استفاده در پژوهش، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول۱–معیارهای مورد استفاده در پژوهش به پتانسیل‌سنجی نصب پانل خورشیدی در ساختمان‌ها

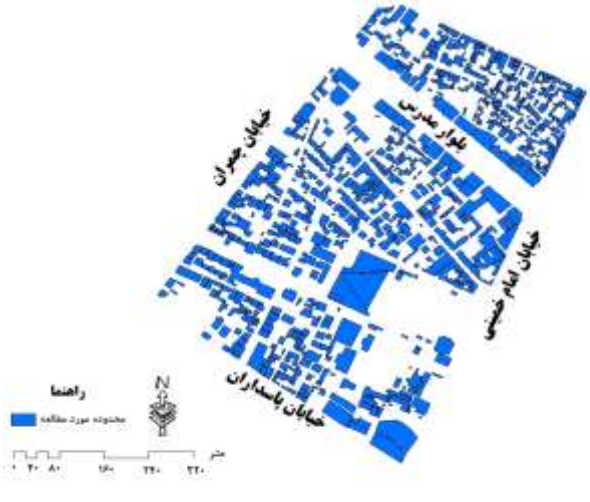
مأخذ: (برایان ،رالپالی، راسموسن و فوله [۲]، ۲۰۱۰، صص.۷–۱؛ ایزیکورد[۳]، ۲۰۰۸، ص. ۹۲۹؛ براندت،۲۰۱۳ ؛ چودهاردی، آگاروال، تومار، کوما [٤]، ۲۰۱٦، ص.۲؛ لی[٥]، ۲۰۱۳، ص. ۲۱؛ فلاح، فرج زاده،اسلامی و سلطانی فر، ۱۳۹۲، ص. ٤؛ عشورنژاد،پاک طینت، درویشی بلوران، ۱۳۹۳، ص. ۳۷؛ فرجی ،پاک طینت،رحیمی کیان، عشورنژاد، ۱۳۹۲، ص. ۵۰؛ نوحه‌گر و همکاران، ۱۳۹٤، ص. ۳۰)

حوزه	شاخص‌های تاثیرگذار (نوع تاثیر)
کالبدی	کاربری قطعات (میزان مصرف انرژی/نیاز به انرژی) ارتفاع ساختمان‌ها (میزان دسترسی به تابش خورشید/ سایه اندازی بر روی ساختمان های دیگر)
اجتماعی	میزان جمعیت (میزان مصرف/نیاز انرژی)
اقتصادی	درآمد ۲۰ ساله
محیط جغرافیایی	شیب محدوده (برآورد میزان انرژی دریافتی) جهت شیب (برآورد میزان انرژی دریافتی) میزان انرژی تابشی خورشید (توان پتانسیل)
	سایه‌اندازی درختان (با توجه به ارتفاع درختان در منطقهٔ مورد مطالعه این فاکتور تأثیری ندارد)
فنی	وسعت /مساحت پشت‌بام (فضای نصب) کیلووات تولیدی

1 Retrieved on 2018/06/08 from https://mcda4arcmap.codeplex.com
2. Brayan et al
3. Izquierdo et al
4. Choudhary et al
5. Li

۳. ٤. قلمرو جغرافیایی پژوهش

بطور کل می‌توان گفت کلان‌شهر مشهد از ظرفیت بالقوهٔ دریافت انرژی خورشیدی برخوردار است (سلیمی‌فر، مهدوی عادلی، رجبی مشهدی، ۱۳۹۲، صص. ۱۱۸–۱۱۷؛ سال‌نامهٔ هواشناسی کشور، ۱۳۹۰) و این پتانسیل لزوم مطالعهٔ دقیق‌تر را ضروری می‌سازد. محدودهٔ مورد مطالعهٔ این پژوهش قسمتی از ناحیهٔ ۲ منطقهٔ ۸ شهر مشهد می‌باشد که از سمت شمال به خیابان سعدی، از سمت غرب به خیابان چمران، از سمت شرق به خیابان امام خمینی و از سمت جنوب به خیابان پاسداران منتهی می‌شود (شکل ۱). مساحت محدوده نزدیک به ٤۰ هکتار بوده و دارای ۹۲۳ قطعه با جمعیت ساکن قریب بر ۱۸۷۰ نفر در سال ۱۳۹۰ می‌باشد (سرشماری عمومی نفوس و مسکن، ۱۳۹۰). این منطقه از جمله مراکز باسابقه و اصلی تجاری در سطح شهر مشهد بوده و طلا و جواهرات، ساعت فروشی و لوازم الکتریکی از جمله کاربری‌های تجاری اصلی این محدوده می‌باشند که همگی دارای میزان مصرف بالای انرژی برق می‌باشند. در سال های اخیر چندین مجموعهٔ تجاری نیز در این محدوده ایجاد شده‌اند. تحلیل اطلاعات جمعیتی و کاربری اراضی موجود نشان می‌دهد که بخش عمدهٔ کاربری‌ها در این محدوده به کاربری مسکونی با قریب به ۷۰ درصد تعلق داشته و کاربری تجاری با نزدیک به ١٦ درصد پس از آن بیشترین نوع کاربری را به خود اختصاص می‌دهد.



شکل ۱– محدودهٔ مورد مطالعه

مآخذ: نگارندگان، ١٣٩٦

٤. مباحث نظری

٤. ١. سیستم‌های فتوولتائیک

یکی از تجهیزات تأمین انرژی برق از نور خورشید سیستم فتوولتائیک است (سلیمی فر، مهدوی عادلی، رجبی مشهدی، ۱۳۹۲، ص. ۱۱۷). سیستم‌های فتوولتائیک یا به اختصار PV (پورسیستانی، ۱۳۹۲، ص. ٥) یکی از رایج‌ترین کاربردهای انرژی‌های نو می‌باشد و تاکنون سیستم‌های گوناگونی با ظرفیت‌های مختلف (۰/٥ وات تا چند مگاوات) در سراسر جهان نصب و راه‌اندازی شده است (یوسفی، کسائیان، رنجبران، کتولی، ۱۳۹٦، ص. ۳۰). اهمیت استفاده از تکنولوژی فتوولتائیک این است که مستقیما و بدون بهره‌گیری از مکانیسم‌های متحرک و شیمیایی، نور خورشید را به برق تبدیل می‌کند (سلیمی‌فر، مهدوی عادلی، رجبی مشهدی، ۱۳۹۲، صص. ۱۱۸-۱۱۷). با توجه به اینکه منبع تغذیهٔ سلو های فتوولتائیک نور مستقیم خورشید می‌باشد از این رو بام‌ها برای فتوولتائیک‌ها بسیار ایده‌آل می‌باشند؛ چرا که معمولاً عوامل سایه‌ساز در پشت‌بام بسیار کمتر از سطح زمین است و معمولاً بام، سطح بدون استفاده وسیعی را بدین منظور در اختیار می‌گذارد (پورسیستانی، ۱۳۹۲، صص. ۷-٦). در این راستا، انتخاب مکان مناسب و لحاظ کردن معیارها و شاخص‌های مؤثر در مکان‌یابی برای نصب و استفاده از این تکنولوژی‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است (یوسفی، کسائیان، رنجبران، کتولی، ۱۳۹٦، ص. ۳۷).

٤. ٢. معیارهای مؤثر در پتانسیل‌سنجی استقرار پانل خورشیدی در پشت‌بام ساختمان‌ها

در مسأله مکان‌یابی، انتخاب معیارها مهم می‌باشد. رهیافت پایه برای مکان‌یابی محل استقرار هر فعالیتی، مستلزم در نظر گرفتن مجموعه‌ای از عوامل محدودکننده مانند شیب، ارتفاع، مناطق حفاظت‌شده و محیط زیست می‌باشد (احمدی، مرشدی، عظیمی، ۱۳۹٥، ص. ٤۳). از طرفی مسائل متنوع زیست‌محیطی و پیچیدگی‌هایی که در روند شکل‌گیری و حل آن-ها وجود دارد، تصمیم‌گیری و فرآیند سیاستگذاری مبتنی بر اطلاعات جامع و مدل‌سازی آن‌ها

را ضروری می‌سازد (شوورمن[1]، ۲۰۱۱، ص. ۳۱۷). معیارهای مؤثر در پتانسیل‌سنجی استقرار پانل خورشیدی در پشت‌بام ساختمان‌ها عبارتند از:

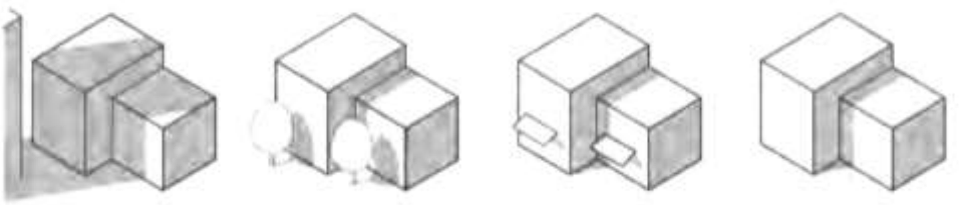
– شیب و جهت شیب: میزان شیب و جهت شیب در میزان جذب تابش خورشیدی نقش بسزایی دارد و پانل‌ها باید در جهتی قرار گیرد که حداکثر تابش را دریافت کند (خاقانی، ۱۳۹۰، ص. ۱۱۳). با افزایش شدت تابش پرتوهای خورشید، مقدار خروج نیروی الکتریکی سیستم فتوولتائیک نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، بازده نیروی سیستم فتوولتائیک با میزان دریافت انرژی خورشید رابطه‌ای مستقیم دارد (حسینی‌گوهری، شکوهی، حکیم آذری، ۱۳۹۵، صص. ۳–٤). از طرفی دیگر، تغییر زاویهٔ تابش خورشید و مقدار تابش در زمان‌های مختلف در طول روز نیز بر تولید نیروی فتوولتائیک اثر می‌گذارد. از این رو بازده سیستم فتوولتائیک به جهت و شیب پانل‌های مستقرشده (در رابطه با تابش خورشید) بستگی دارد و در نتیجه جهت‌گیری و شیب پانل‌های فتوولتائیک متأثر از میزان دریافت انرژی خورشید است (وفایی، ۱۳۹۱، ص. ۷۰). جهت مناسب استقرار پانل‌ها در نیمکرهٔ شمالی به سمت جنوب (جبههٔ جنوبی) یا به صورت افقی می‌باشد (عشورنژاد، پاک طینت، درویشی بلورانی، ۱۳۹۳، ص. ۳۹؛ جعفری، ۱۳۹٤، ص. ٦).

– ارتفاع: تأثیر ارتفاع در مکانیابی پانل، تعیین‌کننده است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵، ص. ٤۳)، افزایش یا کاهش ارتفاع برابر است با افزایش یا کاهش جذب تابش خورشیدی (خاقانی، ۱۳۹۰، ص. ۱۱۳) به این صورت که با افزایش ارتفاع تأثیرات محدودکنندهٔ سایر پدیده‌ها کاهش می‌یابد (عشورنژاد ، پاک طینت، درویشی بلوران، ۱۳۹۲، ص. ۳۹).

– سایه‌اندازها: سایه یکی از عواملی است که بر میزان دسترس به خورشید اثر می‌گذارد. عوامل مختلفی در سایه‌افکنی نقش دارند که عبارت‌اند از: سایهٔ ساختمان‌های اطراف و موانع موجود، سایه خود ساختمان، سایه‌اندازی درختان و سایهٔ پانل‌ها روی یکدیگر ممکن است بر سیستم فتوولتائیک تأثیر بنهد (وفایی، ۱۳۹۱، ص. ۷۱). از این رو ارتفاع ساختمان‌ها به‌عنوان پدیدهٔ اصلی در منطقهٔ مورد مطالعه و سایر عوامل و درختان از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. به

1. Schurman

بیان دیگر، فاصلهٔ بین پشت‌بام‌های فتوولتائیک و اشیای دیگر باید چنان باشد که به ایجاد سایه متصل (پیوسته) نینجامد (شکل ۲) (نصرالهی، توانا فر و روشن، ۱۳۹۵، ص. ۸).



شکل ۲- سایه‌اندازی با توجه به حجم محیط

مأخذ: نصرالهی، توانا فر و روشن، ۱۳۹۵

– توان پتانسیل: توان پتانسیل در اصل همان میزان تابش دریافتی هر نقطه بر روی سطح زمین می‌باشد که با واحد WH/m^2 نشان داده شده و در بر گیرندهٔ تابش‌های مستقیم و غیر مستقیم به آن نقطه می‌باشد. میزان تابش دریافتی نقاط به عرض جغرافیایی و ارتفاع آن‌ها نسبت به عوارض پیرامونی نیز بستگی دارد. نظر به اهمیت عرض جغرافیایی در میزان تابش دریافتی باید دقت کرد که منطقهٔ مورد مطالعه در صورت وسیع بودن به بخش‌های کوچکتر (زیر یک درجه) تقسیم شود تا محاسبات به درستی انجام گیرد. نقشه‌های موقعیت خورشید و گسترهٔ آسمان قابل دید از نقطهٔ مورد نظر نیز از جمله دیگر فاکتورهای تأثیرگذار بر میزان تابش دریافتی می‌باشند که می‌بایست در نظر گرفته شوند.

– میزان کیلووات تولیدی: اگرچه یکی از فاکتورهای اصلی استفاده از انرژی خورشیدی میزان تابش دریافتی می‌باشد؛ اما تنها میزان تابش دریافتی برای استفاده از این انرژی کافی نیست. برای مثال صمدایی معتقد است یک مترمربع سلول خورشیدی در یک روز آفتابی با بازده متوسط ۱۰ درصد در طول روز در مجموع ۸۰۰ وات ساعت برق تولید می‌کند. شرکت توزیع برق خراسان رضوی نیز استقرار یک نیروگاه یک کیلوواتی را منوط به برخورداری از ۱۰ مترمربع فضا می‌کند (شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی، ۱۳۹٦).

– کاربری اراضی: بار جمعیتی، زمان مصرف، میزان مصرف برق به ازای یک نفر در ایران به طور متوسط و با توجه به تولید ۱٦۳ گیگا وات ساعت برای کل جمعیت ایران در سال برابر

۲۳۰۰۰ کیلو وات ساعت در سال می‌باشد که معادل تولید انرژی ۹ متر مربع سلول خورشیدی با بازده ۱۰ درصد است (صمدایی، ۱۳۹۳، ص. ۱۳٤). آنچه که استاندارد شرکت برق تعریف می‌کند این است که متوسط مصرف برق در هر خانوادهٔ ایرانی در سال ۱۳۹۱ به طور تقریبی معادل ٤۰۰KWH در ماه است. بنابراین، برای محاسبهٔ هزینه‌های یک سیستم فتوولتائیک فرض می‌کنیم که مصرف‌کننده در هر ماه به مقدار ٤۰۰KWH برق مصرفی دارد (مهدوی-عادلی، سلیمی فر، قزلباش، ۱۳۹۳، ص. ۱۳۵).

– درآمد بیست‌ساله: انرژی تولیدشده از حاصلضرب توان در زمان به دست می‌آید. E=P*T با فرض این‌که به طور متوسط پانل‌ها در طول روز ٦ ساعت برق تولید کنند انرژی تولیدشده در مدت زمان یک ماه عبارت‌است از: E=1.4*6*30= 240 (سلیمی و همکاران، ۱۳۹۲، صص.۱۲٤–۱۲۳). بنابر اطلاعات شرکت برق منطقه‌ای خراسان رضوی مبلغ خرید انرژی بر مبنای نرخ‌های پایه سال ۱۳۹۵ تا سقف ۲۰ کیلووات ۸۰۰۰ ریال و بین ۲۰ تا ۱۰۰ کیلووات ۷۰۰۰ ریال می‌باشد. البته این نرخ‌ها برای واحدهایی که با تجهیزات برخوردار از دانش فنی، طراحی و ساخت داخل احداث می‌شوند متناسب می‌باشند و حداکثر تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد (شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی، ۱۳۹٦). بنابراین، یک مولد ۵ کیلوواتی سالیانه حدود ۷۵۰۰ کیلووات ساعت تولید خواهد داشت که بدون احتساب نرخ تورم با توجه به شرایط کنونی و با فرض ثبات اقتصادی و فعالیت‌های دولت در راستای کاهش تورم در ۲۰ سال ۱ میلیارد و ۲۰۰ میلیون ریال درآمدزایی خواهد نمود.

٤. ۳. مدل مفهومی

با توجه به مفاهیم مرتبط با موضوع پژوهش «ارزیابی فضایی پتانسیل نصب صفحات خورشیدی با استفاده از GIS» مدل مفهومی پژوهش در قالب شکل ۳ استخراج شده است.



شکل۳ - مدل مفهومی تحقیق

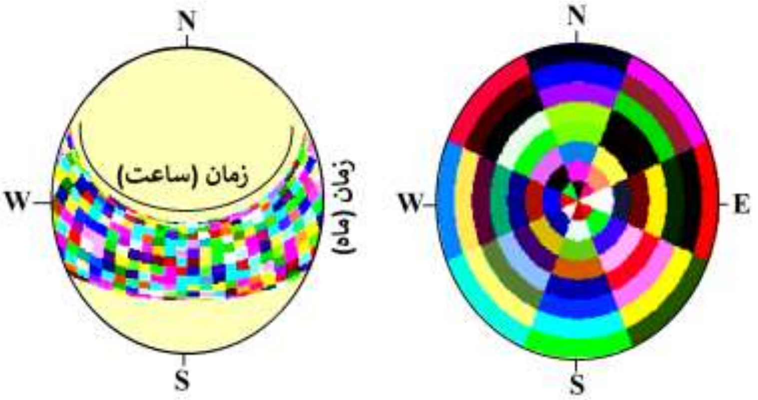
مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۶

۵. یافته‌های پژوهش

مدل‌سازی فضایی عبارت است از شناسایی و تلفیق مجموعه فرآیندهایی که موجب رسیدن به یک هدف خاص می‌شود که ماهیت مکانی دارد. در این راستا حوزه‌های مورد نیاز به معیارهایی تقسیم شد. لایه‌های مورد نیاز جهت انجام مطالعه براساس اطلاعات دریافتی از شهرداری مشهد (نقشه‌های ۱:۲۰۰۰) در چهارچوب پایگاه اطلاعات جغرافیایی در محیط نرم افزار ArcGIS تهیه شد. لازم به ذکر است، اطلاعات ارتفاعی ساختمان‌ها، با برداشت میدانی در محدودهٔ مورد مطالعه و با استفاده از متر لیزری مدل Trimble HD150 و GPS دستی مدل eTrex 30x بازیابی و بروزرسانی شد. در ادامه بنابر پیش‌شرط‌های تعیین‌شده توسط شرکت توزیع نیروی برق جهت استقرار صفحات خورشیدی که فاصله‌ای در حدود ۰/٦ متر از کناره‌های ساختمان را ضروری می‌داند، این مقدار از مساحت پشت‌بام‌ها در محاسبات پژوهش حذف شد. همچنین، پشت‌بام‌های با مساحت کمتر از ۱۰ مترمربع نیز به دلیل کوچکی اندازه و تولید کمتر از ۱ کیلووات در مطالعه ارزیابی نشدند.

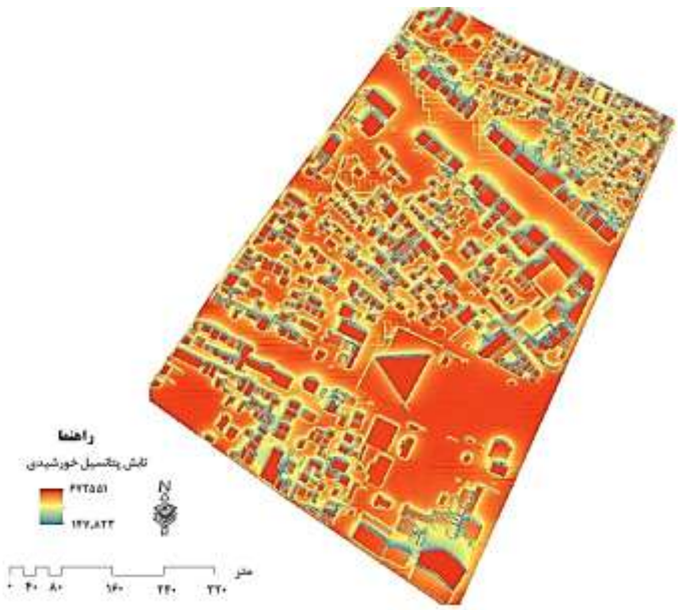
جهت بررسی تابش سطحی دریافتی در سطح پشت‌بام‌ها در مقیاس‌های محلی، اطلاعات مدل رقومی ارتفاع منطقه، ارتفاع ساختمان‌ها، عرض جغرافیایی مرکز منطقه و تاریخ و زمان از جمله موارد تأثیرگذار هستند. از جمله ویژگی‌های دیگر که با توجه به روابط فضایی عوارض، عرض جغرافیایی، موقعیت خورشید در طول روز و فصل براساس فرمول استاندارد نجومی محاسبه می‌شود، نقشه‌های تابش مستقیم خورشید در هر جهت آسمان (sunmap) و نقشهٔ مقادیر تابش پخش‌شده (skymap) در زمان‌های مختلف هستند (شکل ٤) (عشورنژاد و همکاران، ۱۳۹۳، صص. ٤۳–٤۰). در نهایت نقشهٔ تابش پتانسیل برای طول سال که مجموع تابش مستقیم و غیرمستقیم برای هر نقطه در محدودهٔ مورد نظر می‌باشد تهیه شد (فو و ریچ، ۲۰۰۰، صص. ۱۳–۷)[1] (شکل ۵).

1. Fu & Rich



شکل٤- سمت راست Skymap تعریف شده براساس ٨ زنیت-٨ آزیموت. هر رنگ نشان‌دهندۀ بخشی از آسمان می باشد که تابش منتشرشده از آن پراکنده می‌شود. سمت چپ SunMap سالانه برای عرض جغرافیایی شهر مشهد

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ١٣٩٦

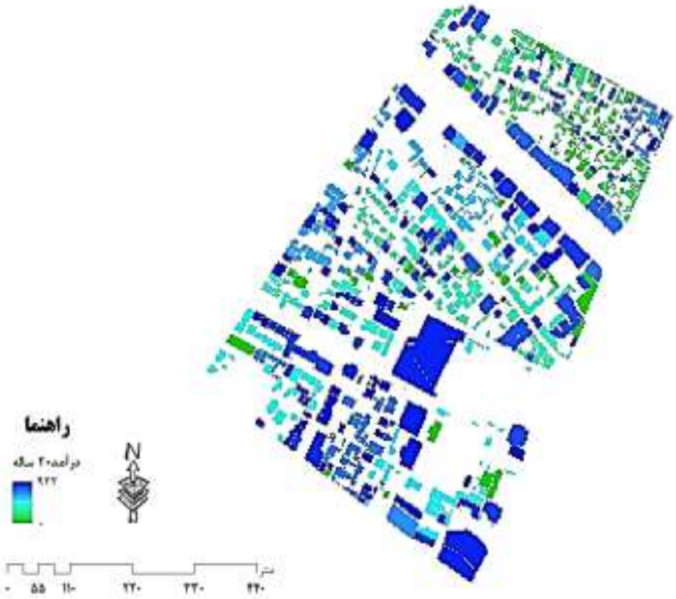


شکل ٥- نقشۀ تابش پتانسیل خورشیدی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ١٣٩٦

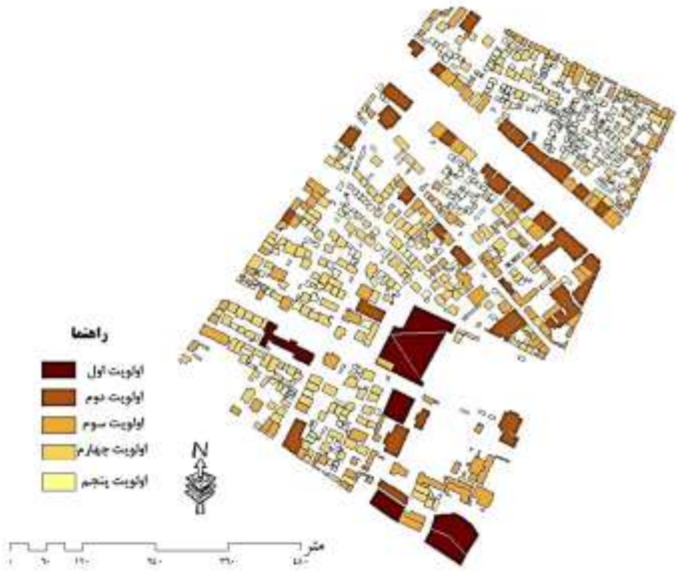
از آنجا که استقرار این صفحات خورشیدی هزینهٔ اولیه دارد و باید دارای توجیه اقتصادی باشد چهار عامل کاربری، کیلووات تولیدی، توان پتانسیل و درآمد بیست‌ساله ارزیابی شد. برای تعیین ارجحیت و وزن‌های هر یک از معیارها، تعداد ۲۵ عدد پرسش‌نامه بین متخصصان توزیع و جمع‌آوری شد و در نهایت از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد تا وزن نهایی معیارها مشخص شود. در پژوهش حاضر وزن شاخص کاربری، درآمد بیست‌ساله، توان پتانسیل و میزان کیلووات تولیدی به ترتیب ۰/۱۴۱، ۰/٤٨٣، ۰/۱۰۱ و ۰/۲۷٦ است. نرخ سازگاری (CR) در پژوهش حاضر ۰/۰۸ می‌باشد که نشان‌دهندهٔ سازگاری قضاوت‌های استفاده‌شده برای مقایسه است.

سپس به منظور ارزیابی پتانسیل هر کدام از ساختمان‌ها برای نصب پانل‌های خورشیدی، از تکنیک میانگین‌گیری وزن‌دار ترتیبی(OWA) استفاده شد. جهت انجام تکنیک میانگین-گیری وزن‌دار ترتیبی، اطلاعات فضایی کاربری، کیلووات تولیدی، توان پتانسیل و درآمد بیست‌ساله (شکل ٦) به مجموعه ابزار MCDM4ArcMAP در نرم افزار ArcGIS وارد شده و مدل OWA بر روی آن‌ها اعمال شد. نتایج حاصل از مدل OWA با استفاده از روش Jenks (۱۹٦۷) یا به عبارت دیگر روش شکست‌های طبیعی که روشی مبتنی بر آمار در تولید نقشه می‌باشد (باسوفی و همکاران، ۲۰۱۵) به پنج گروه از نظر اولویت طبقه‌بندی شدند (شکل ۷). ارزش۱ برای قطعات نامناسب و ارزش ۵ به مناسب‌ترین قطعات برای نصب صفحات خورشیدی اختصاص یافت. استفاده از Jenks به این دلیل است که این روش تعداد بهینه کلاس‌ها با برازش مطلوب واریانس را فراهم می‌آورد (جلی، ۱۳۹٦، صص. ۲۵–۱). به عبارت دیگر، الگوریتم شکست‌های طبیعی نه تنها به دنبال یافتن حداقل اختلاف فاصله بین اعضا و مرکز خوشه و طبقه می‌باشد؛ بلکه در پی به حداکثر رساندن واریانس بین مرکز خوشه ها یعنی تفاوت بین خوشه‌ها و طبقه‌ها نیز هست (خان، ۲۰۱۲). همانطور که در جدول شمارهٔ ۲ مشاهده می‌شود، از مجموع ۹۲۳ قطعهٔ ارزیابی‌شده در پژوهش در محدودهٔ مورد مطالعه، نزدیک به ۱۹ هزارمتر مربع از فضای پشت‌بام‌ها در بهترین شرایط جهت نصب صفحات خورشیدی قرار گرفته‌اند.



شکل ٦- نقشهٔ درآمد بیست‌ساله

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹٦



شکل ۷- پتانسیل ساختمان‌ها جهت نصب صفحات خورشیدی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹٦

جدول ۲- تعداد و مساحت قطعات به تفکیک اولویت جهت نصب صفحات خورشیدی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹٦

ردیف	اولویت	تعداد	مساحت(مترمربع)
۱	اول	۸	۱۸۹۱۱/۷
۲	دوم	۳۸	۲۷۱۸٦/٤
۳	سوم	۱۷۸	۳۳۷۰۱/٦
٤	چهارم	۲۹۹	٤۲۱۷٤/۱
۵	پنجم	٤۰۰	۲۳۸٤۱/۱

٦. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

افزایش جمعیت، گسترش و پراکندگی آن، همگام با نیاز و حرکت روزافزون بشر به سمت توسعهٔ پایدار شهرها و انرژی‌های جدید بهره‌گیری از انرژی خورشیدی را به ضرورت تبدیل کرده است. در این راستا، ایجاد نیروگاه‌های فتوولتائیک نیز با چالش‌هایی همچون توجیه اقتصادی، نیاز به اراضی گسترده، دوری از محل مصرف و اتلاف انرژی رو به رو هستند. از این رو، یکی از بهترین زمینه‌های استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک، استفاده در پشت‌بام ساختمان‌ها جهت تأمین بخشی از برق مصرفی و در صورت مازاد فروش آن به واحدهای پیرامونی می‌باشد. پژوهش حاضر با شناسایی مکان‌های مناسب جهت نصب پانل‌های خورشیدی در سطح منطقهٔ مورد مطالعه، با شناسایی و لحاظ کردن معیارهای مناسب از جمله ارتفاع ساختمان ها و شناسایی نواحی سایه با حذف فضاهای نامناسب پتانسیل بالای نزدیک به ۱۹ هزارمتر مربع از فضای پشت‌بام‌ها را آشکار کرده است. روش ارائه‌شده در این پژوهش می تواند در ارزیابی و سنجش توان بهرگیری از انرژی خورشیدی توسط سرمایه‌گزاران و برنامه ریزان شهری بکار گرفته شده و نتایج آن برای نهادها و ادارات فعال و حتی عموم مردم در زمینهٔ بهره‌گیری از انرژی خورشیدی مفید باشد. علاوه بر این، روش مورد استفاده می‌تواند برای تمامی محدودهٔ شهری پیاده‌سازی شود. انجام مطالعات در زمینهٔ سایر زمینه‌های بهره گیری از انرژی خورشیدی (به غیر از تولید برق) نیز می‌تواند به ایجاد درکی جامع از پتانسیل های انرژی خورشیدی در راستای دستیابی به توسعهٔ پایدار شهری راهگشا باشد.

کتاب‌نامه

۱. احمدی، ه؛ مرشدی، ج؛ عظیمی، ف. (۱۳۹۵). مکانیابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از داده-های اقلیمی و سامانهٔ اطلاعات مکانی(مطالعهٔ موردی: استان ایلام). *فصل‌نامهٔ سنجش از دور و سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۷ (۱)، ۵۷-۴۱.

۲. پورسیستانی، م؛ پورسیستانی، پ. (۱۳۹۲). بررسی کاربری سیستم‌های فتوولتائیک در استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشیدی در ساختمان‌ها. *سومین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی*. تهران. *صص*. ۱۰-۱.

۳. جعفری، ب. (۱۳۹۴). بررسی سیستم‌های فتوولتائیک در معماری نوین. *همایش ملی عمران و معماری با رویکردی بر توسعهٔ پایدار*. فومن و رشت، دانشگاه آزاد اسلامی. *صص*. ۱۳-۱.

۴. حاجیلو، ف؛ جلوخانی‌نیارکی، م. (۱۳۹۵). مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از مدل ANP-OWA (مطالعهٔ موردی: استان زنجان). *نشریهٔ علمی- پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری*، ٦(۱)، ۸٦-۷۳.

۵. حسن‌زاده، ح؛ فرزاد، م.ع. (۱۳۹۰). امکان‌سنجی فنی و اقتصادی استفاده از سیستم ترکیبی فتوولتائیک و پیل سوختی جهت تولید همزمان برق و حرارت در یک واحد مسکونی در شرق ایران. *نشریهٔ انرژی ایران*، ١٤(۲)، ۴۱-۱۹.

٦. حسینی‌گوهری، ا؛ شکوهی، ا؛ حکیم‌آذری، م. (۱۳۹۵). بررسی عوامل مؤثر در افزایش راندمان پانل‌های فتوولتائیک. *کنفرانس بین‌المللی معماری، شهرسازی، عمران، هنر و محیط زیست؛ افق-های آینده، نگاه به گذشته*. تهران. *صص*.۷-۱.

۷. حق‌پرست‌کاشانی، آ؛ صالح‌ایزدخواست، پ؛ لاری، ح. ر. (۱۳۸۸). تدوین اطلس جامع GIS انرژی خورشیدی ایران بر اساس مدل تابش‌سنجی. *بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق*. تهران. صص. ۱۲-۱.

۸. حیدری، م. (۱۳۸۸). مکان‌یابی ساخت نیروگاه‌های خورشیدی در ایران. *مجلهٔ نفت و انرژی*، ٤۹، ۳۷-۲٤.

۹. خاقانی، ج (۱۳۹۰). *رابطهٔ بین میزان جذب انرژی خورشیدی و ارتفاع در استان ایلام*. گزارش نهایی طرح مصوب سازمان هواشناسی. *صص* ۱۱۳-۱.

۱۰. رهنما، م؛ آقاجانی، ح؛ فتاحی، م. (۱۳۹۱). مکان‌یابی محل دفن زباله بـا ترکیـب روش میـانگین-گیری وزن‌دار ترتیبی (OWA) و GIS در مشهد..*مجلهٔ جغرافیا و مخاطرات محیطـی*، ۳، ۱۰۵-۸۷.

۱۱. رهنما، م؛ حیاتی، س؛ شیرزاد، ز؛ کاظمی، م؛ قنبری، م. (۱۳۹٦). تعیین اولویت احیاء بافـت‌هـای فرسودهٔ شهری با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (نمونـه: محلـهٔ سرشـور مشـهد). *مجلهٔ جغرافیا و توسعهٔ فضای شهری*، ٤(۱)، ۳۹-۲۳.

۱۲. سال‌نامهٔ هواشناسی. (۱۳۹۰).

۱۳. سرشماری عمومی نفوس و مسکن. (۱۳۹۰).

۱٤. سلیمی‌فر، م؛ مهدوی عادلی، م.ح؛ رجبـی مشـهدی، ح؛ قزلبـاش، ا. (۱۳۹۲). ارزیـابی اقتصـادی انرزی برق خورشیدی (فتوولتائیک) و برق فسیلی در یـک واحـد خـانگی در شهرسـتان مشـهد. *فصل‌نامهٔ علمی- پژوهشی اقتصادیِ کاربردی ایران*، ۲(۸)، ۱۳٦-۱۱۵.

۱۵. صمدایی، ع. (۱۳۹۳). *گزارش پروژهٔ پژوهشی امکان‌سنجی بکارگیری انرژی خورشید در تـأمین انرژی الکتریکی به وسیلهٔ سیستم فتوولتائیک*. مازندران، سازمان نظام مهندسـی سـاختمان اسـتان مازندران، ۱۸۷-۱.

۱٦. عساکره، ع؛ غدیریان‌فر، م؛ شیخ‌داودی، م.ج. (۱۳۹٤). امکان‌سنجی تولید برق از پنل خورشـیدی پشت‌بام در مناطق روستایی استان خوزستان. *فصل‌نامهٔ جغرافیا و توسعه*، (٤۳)، ۱۳۲-۱۱۳.

۱۷. عشورنژاد، غ؛ پاک‌طینت، ه؛ درویشی‌بلورانی، ع. (۱۳۹۳). مدل‌سازی مکان بهینهٔ استقرار پانل‌های خورشیدی در پشت بام ساختمان‌ها با استفاده از GIS (مطالعهٔ موردی حد واسط خیابان وصـال تا خیابان قدس شهر تهران. *مجلهٔ جغرافیا و آمایش شهری- منطقه ای*، (۱۲)، ۵۰-۳۳.

۱۸. فرجی‌سبکبار، ح. ع؛ پاک‌طینت‌مهدی‌آبادی، ه؛ رحیمـی‌کیـان، ا؛ عشـورنژاد، غ. (۱۳۹۲). تناسـب سنجی اراضی به منظور احداث مزارع فتوولتائیک به کمک تلفیق سیستم‌های جمع ساده وزنـی و استنتاج فازی در ایران. *مجلهٔ پژوهش جغرافیای طبیعی*، ٤۵ (٤)، ٦۰-٤۵.

۱۹. فلاح، م؛ فرج‌زاده، م؛ اسلامی، ع.ر؛ سلطانی‌فر، ا. (۱۳۹٤). مکان‌یـابی نیروگـاه خورشـیدی اسـتان مازندران با تلفیق فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS). *سـومین کنگرهٔ بین المللی عمران، معماری و توسعهٔ شهری*. تهران. صص ۸-۱.

۲۰. کمالی، غ. ع؛ مرادی، ا. (۱۳۸۵). *تابش خورشیدی، اصول و کاربردها در کشاورزی و انرژی‌هـای نو*. تهران: انتشارات پژوهشکدهٔ هواشناسی.

۲۱. کمانگر، م؛ نوحه‌گر، ا؛ صحراگرد، ن؛ آریانژاد، ح، بداغی، م. (۱۳۹٤). مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی حرارتی جهت تأمین انرژی پایدار با استفاده از منطق فازی. *نشریهٔ انرژی ایران*، ۱۹(۱)، ۱۵۲–۱۳۷.

۲۲. موقری، ع؛ طاوسی، ت. (۱۳۹۲). امکان‌سنجی و پهنه‌بندی مکان‌های مستعد جهت استقرار پنل-های خورشیدی با تکیه بر فراسنج‌های اقلیمی در استان سیستان و بلوچستان. *مجلهٔ پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاستگذاری انرژی*، ۱(۱)، ۱۱٤–۹۹.

۲۳. مهدوی‌عادلی، م. ح؛ سلیمی‌فر، م؛ قزلباش، ا. (۱۳۹۳). ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی برق خورشیدی (فتوولتائیک) و برق فسیلی در مصارف خانگی (مطالعهٔ موردی: مجتمع سه واحدی در شهرستان مشهد). *مجلهٔ علمی- پژوهشی سیاست گذاری اقتصادی*، ٦(۱۱)، ۱٤۷–۱۲۳.

۲٤. نوحه‌گر، ا؛ کمانگر، م؛ کرمی، پ؛ احمدی دوست، ب. (۱۳۹٤). مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی از طریق قاعده تصمیم‌گیری مکانی تاپسیس(مطالعهٔ موردی: استان هرمزگان). *فصل‌نامهٔ آمایش محیط*، ۳۳، ٤٤–۲۵.

۲۵. وفایی، ر. (۱۳۹۱). بررسی شیوه‌های طراحی سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان. *اولین همایش ملی اندیشه‌ها و فناوری‌های نو در معماری*. تبریز، صص. ۸۰–٦۹.

۲٦. هاتفی‌اردکانی، مهدی؛ رضائی مقدم، محمد حسین (۱۳۹٤). کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و GIS در امکان‌سنجی از انرژی خورشیدی برای تأمین سامانه‌های روشنایی (منطقهٔ موردی: بزرگراه زنجان- تبریز). *فصل‌نامهٔ مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ٦ (۲۱) ، ۱۲٤–۱۰۵.

۲۷. یوسفی، ح؛ کسائیان، ع؛ رنجبران، پ؛ کتولی، م.ه. (۱۳۹٦). مروری بر معیارهای مکانی احداث نیروگاههای خورشیدی در ایران. *نشریهٔ علمی- ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی*، ۸(۲)، ۳۸–۲۵.

28. Basofi, A., Fariza, A., Ahsan, A. S., & Kamal, I. M. (2015). A comparison between natural and Head/tail breaks in LSI (Landslide susceptibility index) classification for landslide susceptibility mapping: A case study in Ponorogo, East Java, Indonesia. In *2015 International Conference on Science in Information Technology (ICSITech)* (pp. 337-342). Yogyakarta, Indonesia: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

29. Brandt, D. C. (2013). *Rooftop solar capacity modeling using GIS within the city of Stillwater, MN.* (Unpublished master's thesis), University of Wisconsin - River Falls Madison, WI.

30. Bryan, H., Rallapalli, H., Rasmussen, P., & Fowles, G. (2010). Methodology for estimating the rooftop solar feasibility on an urban scale. In R. Campbell-Howe (Ed.), *39th ASES National Solar Conference 2010, SOLAR 2010* (Vol. 1, pp. 476-505). Phoenix, AZ: American Solar Energy Society (ASES).
31. Choudhary, E., Aggarwal, D., Tomar, R. K., & Kumari, M. (2016). Assessment of solar energy potential on rooftops using GIS for installation of solar panels: A case study. *Indian Journal of Science and Technology, 9*(60), 1-4.
32. Fu, P., & Rich, P. M. (2002). A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, *37*(1), 25-35.
33. Gili, A., Álvarez, C., Bagnato, R., & Noellemeyer, E. (2017). Comparison of three methods for delineating management zones for site-specific crop management. *Computers and Electronics in Agriculture, 139*, 213-223.
34. Izquierdo, S., Rodrigues, M., & Fueyo, N. (2008). A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy, 82*(10), 929-939.
35. Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography*, *7*, 186-190.
36. Jiang, H., & Eastman, J. R. (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, *14*(2), 173-184.
37. Kahraman, C., Cebeci, U., & Ulukan, Z. (2003). Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. *Logistics Information Management*, *16*(6), 382-394.
38. Khan, F. (2012). An initial seed selection algorithm for k-means clustering of georeferenced data to improve replicability of cluster assignments for mapping application. *Applied Soft Computing*, *12*(11), 3698-3700.
39. Li, D. (2013). *Using GIS and remote sensing techniques for solar panel installation site selection* (Unpublished master's thesis). University of Waterloo, Waterloo, Canada.
40. Schurman, P. (2011). *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*. Washington, DC: United States Government Printing Office.